# 矿区复垦对土壤养分和酶活性以及微生物数量的影响

李智兰

(山西省水利水电勘测设计研究院, 山西 太原 030024)

**摘 要**: [目的] 研究矿区复垦对土壤养分和酶活性以及微生物的影响,并揭示其时空演变规律。[方法] 以安徽省庐江钒矿区碳质页岩风化物区域的复垦土壤为对象,采用野外调查和室内分析的方法,对矿区复垦下的土壤养分、酶活性及微生物数量展开调查。[结果] 随着复垦年限的增加,土壤电导率、含水量和全盐含量均明显增加,土壤容重、pH 值和总孔隙度则明显降低;随着复垦年限的增加,土壤全钾和有效钾含量均降低,有机质、全氮、碱解氮、微生物量碳和微生物量氮增加,而全磷和有效磷并没有明显的变化趋势,其中土壤微生物量的变化幅度最大,对复垦的响应最为敏感;随着复垦年限的增加,矿区土壤蔗糖酶、脱氢酶、脲酶、碱性磷酸酶活性和微生物数量均有所增加,但其增加幅度逐渐减小,细菌数量处于绝对优势地位,占到微生物总数的 99.3%以上;随着土层深度的增加,土壤酶活性、微生物数量和土壤养分均呈降低趋势,表现出明显的"表聚性",同层相比,基本呈现出:60 a>40 a>20 a>5 a 规律,局部有所波动。[结论] 矿区复垦能够改善土壤质量和土壤肥力;矿区复垦过程中通过影响土壤微生物活动和代谢进而影响土壤养分及酶活性,同时土壤微生物与养分和酶活性等地下生态指标之间在复垦过程中具有统一性。

**关键词**: 矿区复垦土壤; 土壤养分; 酶活性; 微生物数量

**文献标识码**: A **文章编号**: 1000-288X(2015)02-0006-08 **中图分类号**: S157.1, X171.1

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.02.004

# Soil Nutrients, Enzyme Activity and Microbe Quantity in Reclaimed Soil in Mining Area

LI Zhilan

(*Shanxi Water Conservancy Exploration and Design Institute, Taiyuan, Shanxi* 030024, *China*)

**Abstract**: [Objective] This paper aimed to illustrate the spatial-temporal change of soil nutrients, enzyme activity and microbe quantity when mined area was reclaimed. [Methods] Through collecting samples at different depths in soil with different reclaimed age in Lujiang mined area, soil nutrients, enzyme activity and microbe quantity were measured and soil physical-chemical indexes were investigated. [Results] The statistical analysis revealed that as reclamation years increased, the soil pH value, soil bulk density and total porosity reduced gradually and the soil electrical conductivity, moisture content and total salt increased gradually. Meanwhile, the total potassium and effective potassium content reduced, and organic matter, total nitrogen, alkali-hydrolyzale nitrogen, microbial biomass carbon and nitrogen increased gradually, while P had no obvious trend. Microbial biomass was most sensitive to mine reclamation with the largest variation. Soil urease, sucrase, dehydrogenase, alkaline phosphatase activity and microbe quantity increased with the increasing of reclamation years. In the mine soil, bacteria were predominant(more than 99.3% in amount), actinomyces ranked next, and fungi amount was the least among the three communities of soil microbes. With the increasing of depth, soil nutrients, enzyme activity and microbe quantity declined gradually, which implied that they had the "surface accumulation". At the same soil layer with different reclamation years, soil nutrients, enzyme activity and microbe quantity largely ranked as: 60 a>40 a>20 a>5 a, though local fluctuation existed. [Conclusion] Mine reclamation could improve soil quality and soil fertility, and the soil microbial metabolism. The later could influence the soil nutrient and enzyme activity in the mine soil, which suggested that all the factors in soil system were in a dynamic change and in balance. They have two traits, one of the trait is that they interacte and influence each other as a combined unity, and the other one is that they behaved dy-

**收稿日期**:2014-09-27 **修回日期**:2014-10-24

**资助项目**:国家自然科学青年基金项目"典型煤矿区煤矸石自燃源多环芳烃的形成机制与释放模式"(41103052)

**第一作者**:李智兰(1970—),女(汉族),山西省文水县人,硕士,高级工程师,主要从事水土保持及环境影响评价工作。E-mail:zhilanlee@163.com。

namically balanced. The two traits imply that have the uniformity and synchronicity in soil.
**Keywords: reclaimed soil in mining area; soil nutrients; enzyme activity; microbe quantity**

随着经济的高速发展和矿产资源高强度的开发,矿区已成为当今世界退化最为严重的生态系统之一[1-3],矿区开采和利用过程中对地表的破坏以及固体废弃物堆积造成的污染,不仅占用大量的耕地资源,而且破坏了矿区土壤系统生物多样性,矿区基质由于缺少熟化土壤,营养贫瘠,其微生物活性也减弱[1-5],为恢复矿区生态环境和遏制土地锐减的趋势,大力开展矿区土地复垦工作已成为当今之重[1-3,6-9]。

土壤是生态系统中的重要组成部分,土壤微生物和养分在有机物质分解转化过程中起主导作用,影响着土壤生态系统中能量流动和物质循环,反映出土壤质量和健康状况等[10-11];土壤酶活性能参与多种反应(如矿化—同化、氧化—还原等),是有机质代谢及污染物降解的驱动力,是土壤环境质量评价不可缺少的重要生物学指标[12-14]。研究土壤养分和酶活性以及微生物数量对复垦的响应,对于采取合理的复垦方式以加快矿区生态恢复具有重要意义[1-3,6-9]。国外的复垦工作研究起步较早,主要集中在复垦土壤重构及其基本特性等方面[1-5],而我国土地复垦工作起步较晚,大量学者在复垦土壤研究方面取得一些进展,初步建立了煤矸石、露天矿排土场等固体废弃物复垦土壤重构的原理和方法[6-9,15-16],并且进行了植被构建、土壤养分和防治水土流失等的研究[6-9,15-16],而对较长时序以碳质页岩为主的矸石风化物形成的复垦土壤养分和酶活性以及微生物数量等方面的研究少有报告。鉴于此,本研究以安徽庐江矿区碳质页岩风化物区域的复垦土壤为对象,分析矿区复垦对土壤养分和酶活性以及微生物数量的影响并揭示该区复垦过程中时空演变规律,为矿区复垦、土壤生态系统的恢复和重建提供的理论基础和科学依据。

# 1　材料与方法

## 1.1　研究区概况

安徽省庐江矿区位于安徽省巢湖市西南缘,地理坐标为东经 117°42′45″—118°26′07″,北纬 31°15′30″—31°46′18″,属于亚热带温暖湿润季风气候,春夏多雨,四季分明,年平均气温 16.2 ℃,极端最高温度 39.4 ℃,极端最低温度−8.7 ℃,1 月平均气温2.3 ℃,7 月平均气温 28.9 ℃,日最大温差 13 ℃左右,近10 a 来平均年降雨量为 1 200～1 400 mm,多集中于 7—9 月,年平均相对湿度 60%～70%,全年日照数2 200～2 500 h,无霜期 180～250 d,全年主导风向为东南季风,年均风速 2.8 m/s,最大风速 15 m/s,矿区总面积 15 $km^2$,庐江钒矿区碳质页岩风化物区域地貌为低山和丘陵地带,海拔在 150～320 m 之间。

安徽省庐江钒矿区近百年的开采形成了多座排土场,已进入开采晚期,矿区排弃物主要以碳质页岩为主,其岩性主要是碳质页岩、砂岩、硅质页岩及少量的石灰岩和石英岩,原有的植被、地貌被排弃物覆盖,自 20 世纪初期开始堆积,在堆积过程中发现有煤矿和钒矿存在,20 世纪 20 年代末期停止堆积,复垦年限已达到 60 a;周边排土场堆积历史较晚,自 20 世纪中期开始堆积,逐层堆积的方式,复垦年限达到 20 和 40 a,因此对复垦年限 20 和 40 a 矿区来说,矸石堆积年限较长的地区位于排土场底部,最上层为堆积年限较短矸石,其他排土场顶层近年来开始大面积的复垦活动,复垦时间距采样时间(2013 年)有 5 a 的复垦历史。

## 1.2　研究方法

1.2.1　**样品采集**　采样时间为 2013 年 8 月,通过实地调查、查阅历史资料以及访问当地老矿工,根据矸石山堆积和复垦的历史,分别选取不同复垦年限(5,20,40,60 a)的复垦地作为研究样地。根据复垦后土壤风化深度状况,按“S”形多点采样法在每个样地用无菌小铁铲采集 0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm,采至矸石未风化或风化较微弱处为止,采样时除去土壤表面动植物残体,所采土壤样品充分混匀后用聚乙烯无菌塑料袋密封包好,并迅速带回实验室内分析测定,所取土样分为 4 份,一份装自封袋中,测定土壤含水量(烘干法),一份新鲜土样过 2 mm 筛后测定土壤酶活性,一份自然风干(20 d)去除碎片和部分根后过 0.5 mm 筛测定土壤养分及理化性质,一份放入 4 ℃冰箱中测定土壤微生物量,并在取样点附近挖取剖面测定土壤容重(环刀法)计算土壤总孔隙度(%)[9]。

1.2.2　**样品的测定**　(1) 土壤理化性质及养分含量的测定。pH 值采用电极电位法(1∶2.5 土水比)测定;土壤电导率(5∶1 水土比浸提液,μS/cm)采用 P4 多功能测定仪测定;全盐采用电导法(%);土壤有机碳(g/kg)采用重铬酸钾氧化外加热法;土壤全氮(g/kg)用全自动凯氏定氮法;土壤全磷(g/kg)用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法;有效磷(mg/kg)采用 $NaHCO_3$ 浸提—钼锑抗比色法测定;碱解氮(mg/kg)采用 NaOH—$H_3BO_3$ 法测定;全钾(g/kg)采用火焰分光光度法;有效钾采用乙酸铵浸提—原子吸收分光光度计法;土壤微生物量碳、氮采用氯仿熏蒸—$K_2SO_4$ 浸提法[17]。(2) 土壤微生物的数量测定。采用平板梯

度稀释法，其中细菌培养基为牛肉膏蛋白胨琼脂培养基，真菌培养基为马丁氏培养基，放线菌培养基为高氏一号琼脂培养基[18]。(3) 土壤酶活性参照文献[6]。土壤蔗糖酶活性采用3,5—二硝基水杨酸比色法〔mg/(g·d)〕；脱氢酶活性采用三苯基四唑氯化物(TTC)法〔μg/(g·d)〕；脲酶活性采用苯酚钠比色法〔mg/(g·d)〕；磷酸酶活性〔mg/(g·d)〕测定采用磷酸苯二钠法测定。

### 1.3 数据处理

利用Excel和SPSS 18.0对数据统计和分析，显著性分析采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著法(LSD)，Pearson相关性系数检验扰动区域和未扰动区域植被与土壤因子的相关性，制图采用Origin 7.5软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 矿区复垦对土壤理化性质的影响

由表1可知，矿区复垦年限对土壤理化性质有较大的影响，随着复垦年限的增加，土壤电导率、含水量和全盐含量均明显增加，主要是由于土壤入渗和持水能力增大，随着复垦年限的增加，土壤变得疏松，从而增加了对水分的渗透与蓄积能力，进而增加了土壤中可溶性离子，导致电导率和全盐含量均增加；而土壤容重、pH值和总孔隙度则明显降低，随复垦年限的增加土壤容重和总孔隙度降低，主要与植被地下根系在土壤中的空间分布有关。pH值的变化范围在6.14～8.87，随着复垦年限的增加，pH值逐年降低，并且降低幅度较大。

表1 矿区复垦对土壤理化性质的影响

| 复垦年限/a | 容重/(g·cm$^{-3}$) | pH值 | 电导率/(μS·cm$^{-2}$) | 含水量/% | 总孔隙度/% | 全盐/% |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 1.317±0.012$^{a}$ | 8.87±0.12$^{a}$ | 68.56±2.45$^{c}$ | 8.56±0.18$^{c}$ | 53.25±0.48$^{a}$ | 0.489±0.013$^{b}$ |
| 20 | 1.189±0.028$^{b}$ | 7.65±0.26$^{b}$ | 86.56±1.23$^{b}$ | 11.23±0.24$^{b}$ | 50.56±0.44$^{ab}$ | 0.645±0.025$^{a}$ |
| 40 | 1.106±0.011$^{b}$ | 7.13±0.11$^{b}$ | 89.89±1.15$^{ab}$ | 12.37±0.15$^{b}$ | 49.12±0.25$^{b}$ | 0.667±0.019$^{a}$ |
| 60 | 1.056±0.009$^{b}$ | 6.14±0.08$^{c}$ | 92.47±2.13$^{a}$ | 13.12±0.23$^{a}$ | 48.17±0.33$^{c}$ | 0.752±0.027$^{a}$ |

注：同列不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。下同

### 2.2 矿区复垦对土壤养分的影响

由图1可知，矿区复垦可以改善土壤质量和土壤肥力。随着复垦时间的增加，矿区复垦土壤的全钾和有效钾含量均降低，有机质、全氮、碱解氮、微生物量碳和微生物量氮有所升高，而全磷和有效磷并没有明显的变化趋势。有机质变化范围在11.23～28.79 g/kg，最大值出现在复垦60 a的矿区土壤中，最小值在复垦5 a的矿区土壤中；从土壤氮素水平上可以看出，全氮变化在1.257～3.356 g/kg，而碱解氮变化在25.48～56.78 mg/kg，最大值均出现在复垦60 a的矿区土壤中，最小值分别在复垦5 a的矿区土壤中；从土壤磷素水平得知，全磷含量变化在0.997～1.187 g/kg，有效磷变化在41.37～43.56 mg/kg，并没有明显的变化规律；从土壤钾素水平看，全钾变化在20.25～24.15 g/kg，有效钾变化在1.87～6.87 mg/kg，最大值均出现在复垦5 a的矿区土壤中，最小值分别在复垦60 a的矿区土壤中；从土壤微生物量看，微生物量碳变化在126.38～200.36 mg/kg，微生物量氮变化在24.13～70.24 mg/kg，最大值均出现在复垦60 a的矿区土壤中，最小值分别在复垦5 a的矿区土壤中。

### 2.3 矿区复垦对土壤酶活性的影响

土壤酶活性能够灵敏地反映土壤管理措施的变化，可用于表征土壤养分循环速率。由表2可知，土壤酶活性均随着矿区复垦时间延长而逐渐提高，随着复垦时间的增加，矿区蔗糖酶、脱氢酶、脲酶和碱性磷酸酶活性均有所增加。蔗糖酶、脱氢酶、脲酶和碱性磷酸酶活性变化范围分别在87.89～187.56 mg/(g·d)，0.21～0.68 mg/(g·d)，0.13～0.85 mg/(g·d)，82.64～321.56 mg/(g·d)，最大值均出现在复垦5 a的矿区土壤中，最小值分别在复垦60 a的矿区土壤中。

表2 矿区复垦对土壤酶活性的影响

| 复垦年限/a | 蔗糖/(mg·g$^{-1}$·d$^{-1}$) | 脱氢酶/(μg·g$^{-1}$·d$^{-1}$) | 脲酶/(mg·g$^{-1}$·d$^{-1}$) | 碱性磷酸酶/(mg·g$^{-1}$·d$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| 5 | 87.89±9.8$^{c}$ | 0.21±0.02$^{c}$ | 0.13±0.03$^{c}$ | 82.64±10.2$^{d}$ |
| 20 | 157.45±10.5$^{b}$ | 0.52±0.05$^{b}$ | 0.53±0.06$^{b}$ | 223.47±16.8$^{c}$ |
| 40 | 182.38±7.6$^{a}$ | 0.60±0.04$^{ab}$ | 0.72±0.04$^{a}$ | 294.12±21.5$^{b}$ |
| 60 | 187.56±9.2$^{a}$ | 0.68±0.03$^{a}$ | 0.85±0.06$^{a}$ | 321.56±19.7$^{a}$ |

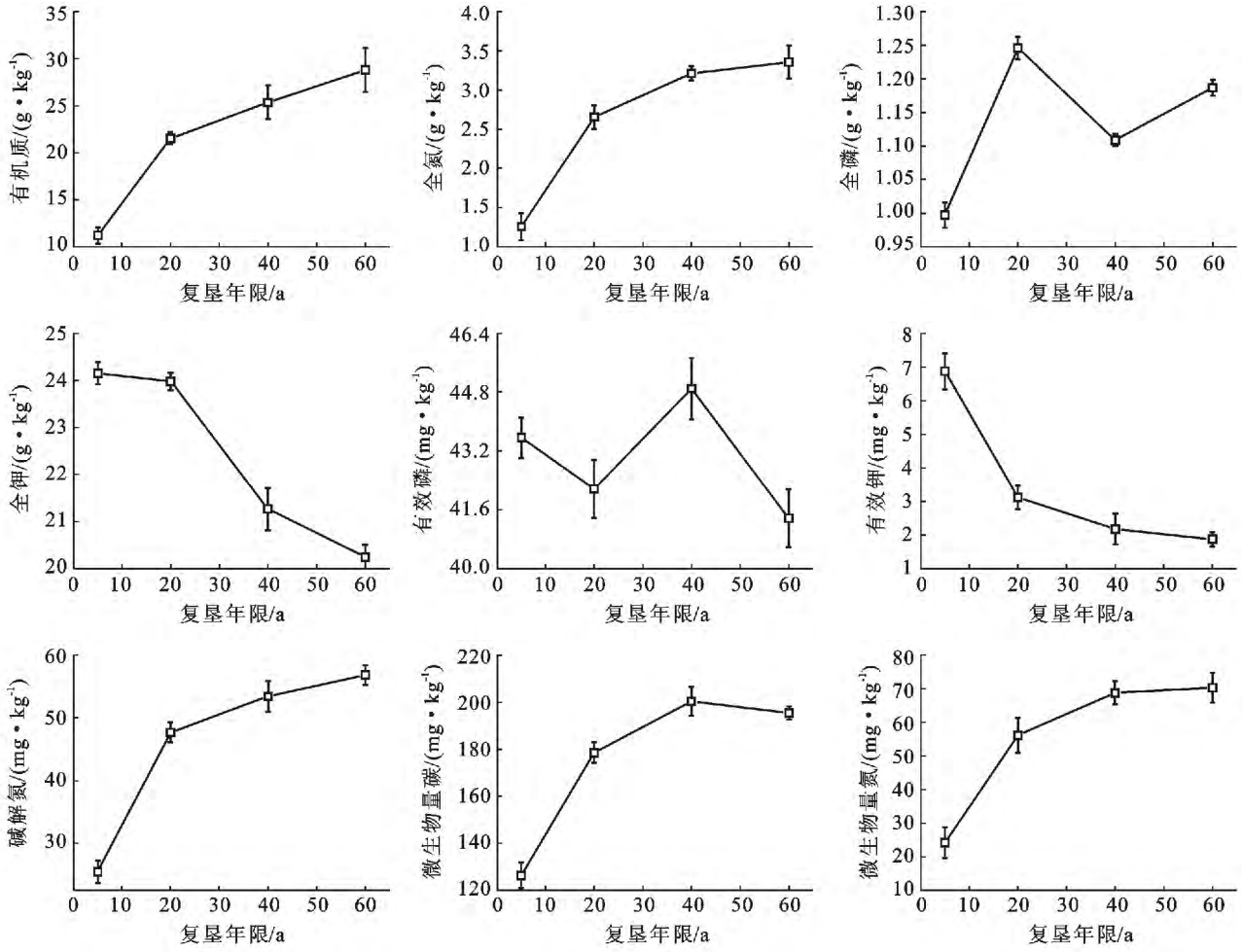



**图 1　矿区复垦对土壤养分的影响**

### 2.4　矿区复垦对土壤微生物数量的影响

土壤微生物的数量分布,不仅可以敏感地反映土壤质量的变化,而且是土壤中生物活性的具体体现。根据采样点数据,得到不同复垦年限下土壤微生物数量的变化(表 3)。由表 3 可知,不同复垦年限的土壤各类群微生物数量与总微生物数量均存在较大差异,土壤微生物总数逐渐增加,细菌、真菌和放线菌与微生物总数的变化趋势相一致,在组成微生物种群的细菌、放线菌和真菌三大类中,细菌数量处于绝对优势地位,占到微生物总数的 99.3%以上,放线菌和真菌所占的比例较少,从放线菌和真菌所占比例来看,放线菌近似相等于真菌。随着复垦时间的增加,矿区复垦细菌、真菌和放线菌有所升高,细菌、真菌和放线菌变化范围分别在 425.12～1 045.12 cfu/g,2.56～8.13 cfu/g,0.42～8.01 cfu/g,最大值均出现在复垦 60 a 的矿区土壤中,最小值分别在复垦 5 a 的矿区土壤中。经统计检验可知,复垦 40 和 60 a 矿区土壤中细菌、真菌、放线菌和微生物总数差异并不显著($p>0.05$),显著高于复垦 5 和 20 a 矿区土壤中细菌、真菌、放线菌和微生物总数($p<0.05$),随复垦年限的增加,矿区土壤中细菌、真菌、放线菌和微生物总数逐渐增加,但其增加幅度逐渐减小。

**表 3　矿区复垦对土壤微生物数量的影响**

| 复垦年限/a | 细菌 | | 放线菌 | | 真菌 | | 微生物总数/($10^5$ cfu/g) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 数量/($10^5$ cfu/g) | 百分数/% | 数量/($10^5$ cfu/g) | 百分数/% | 数量/($10^5$ cfu/g) | 百分数/% | |
| 5 | 425.12±42.33$^c$ | 99.30 | 2.56±0.58$^c$ | 0.60 | 0.42±0.13 | 0.10 | 428.10±62.78$^c$ |
| 20 | 763.78±51.74$^b$ | 98.62 | 5.45±1.23$^b$ | 0.70 | 5.23±1.45 | 0.68 | 774.46±84.32$^b$ |
| 40 | 945.41±39.58$^a$ | 98.35 | 7.97±1.46$^a$ | 0.83 | 7.89±1.78 | 0.82 | 961.27±71.45$^a$ |
| 60 | 1 045.12±65.25$^a$ | 98.48 | 8.13±2.15$^a$ | 0.77 | 8.01±2.03 | 0.75 | 1 061.26±132.45$^a$ |

注:同列不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。下同。

### 2.5 矿区复垦对土壤酶活性、微生物数量、土壤养分垂直分布的影响

由图 2—3 可知，矿区复垦对土壤酶活性、微生物数量、土壤养分垂直分布具有显著影响，随着土层深度的增加，土壤酶活性、微生物数量和土壤养分均呈降低趋势表现出明显的“表聚性”，土壤表层以下，土壤酶活性、微生物数量和土壤养分急剧降低，10 cm 土层以下，土壤酶活性、微生物数量和土壤养分下降幅度逐渐降低；同层相比，基本出现 60 a＞40 a＞20 a＞5 a 规律，局部有所波动。

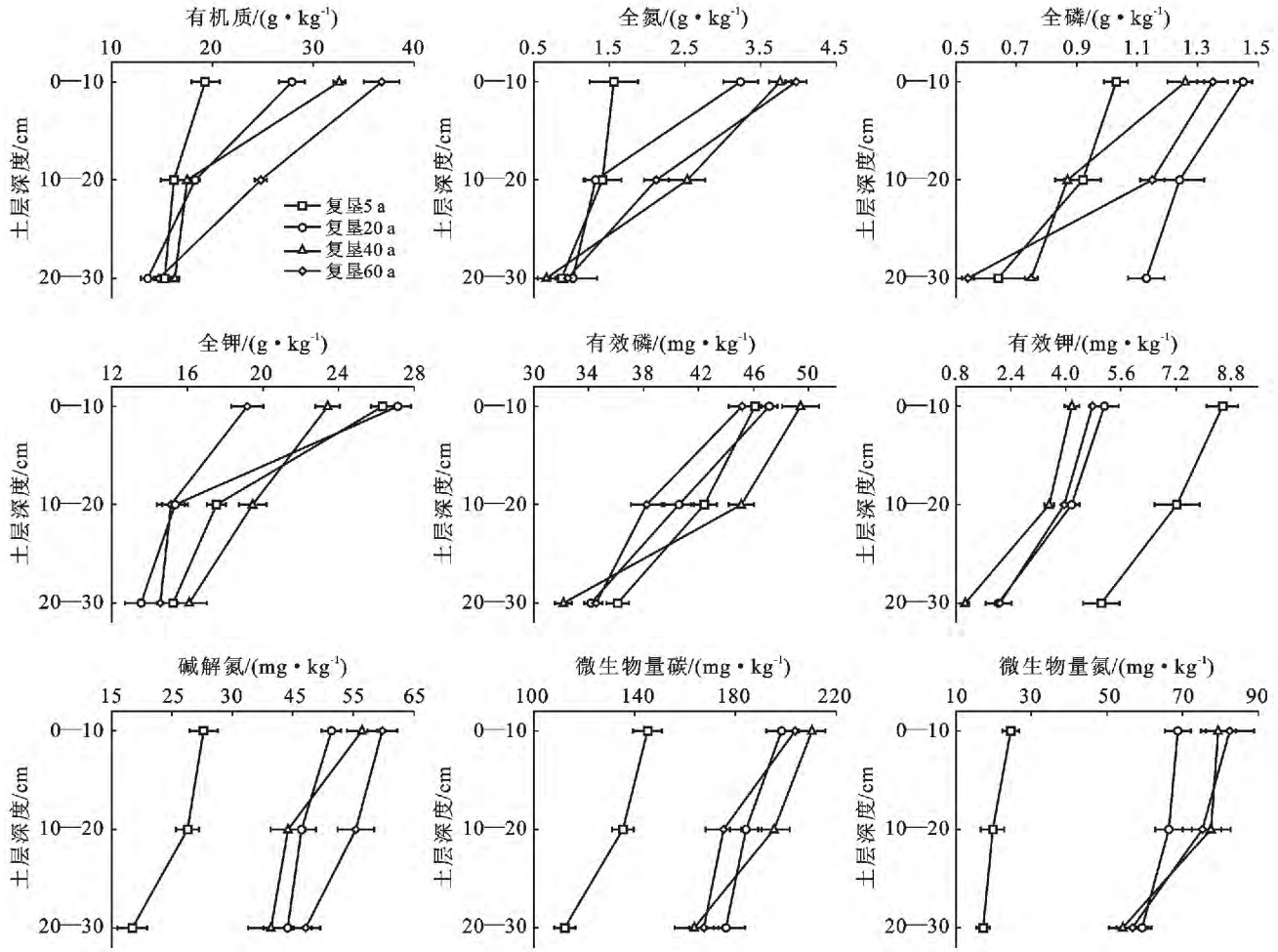



图 2 矿区复垦对土壤养分垂直分布的影响

### 2.6 土壤酶活性、微生物数量与土壤养分相关分析

由表 4 可知，土壤有机碳与蔗糖酶、脱氢酶、磷酸酶和细菌数量呈极显著正相关（$p<0.01$），与脲酶活性和放线菌数量呈显著正相关（$p<0.05$）；全氮与蔗糖酶、脱氢酶和脲酶呈极显著正相关（$p<0.01$），与磷酸酶和细菌数量呈显著正相关（$p<0.05$）；全磷与蔗糖酶活性呈显著正相关（$p<0.05$）；全钾与蔗糖酶、脱氢酶和脲酶呈极显著正相关（$p<0.01$），与细菌和放线菌呈显著正相关（$p<0.05$）；有效磷与蔗糖酶、脱氢酶、脲酶、细菌和放线菌数量呈极显著负相关（$p<0.01$），与磷酸酶活性呈显著负相关（$p<0.05$）；碱解氮与脲酶、磷酸酶和细菌数量呈极显著负相关（$p<0.01$），与蔗糖酶和放线菌数量呈显著负相关（$p<0.05$）；有效钾与蔗糖酶、脱氢酶、脲酶和真菌数量呈极显著负相关（$p<0.01$），与磷酸酶和放线菌数量呈显著负相关（$p<0.05$）；微生物量碳与蔗糖酶、脱氢酶、脲酶和细菌数量呈极显著正相关（$p<0.01$），与磷酸酶、放线菌和真菌数量呈显著正相关（$p<0.05$）；微生物量氮与脲酶、细菌和放线菌数量呈极显著正相关（$p<0.01$），与蔗糖酶、脱氢酶和真菌数量呈显著正相关（$p<0.05$）。

## 3 讨论与结论

### 3.1 矿区复垦对土壤理化性质的影响

矿区复垦对土壤理化性质会产生影响，影响土壤中水盐溶解平衡，安徽庐江复垦区是以碳质页岩为主的较容易风化的黏土矿物，由于受季风气候、生物和人为因素的影响，矸石风化速度加快，在风化过程中，

碳质页岩中伴生的黄铁矿在风化过程中析出硫酸使得土壤呈现酸性[6,19-20],随着复垦时间的增加,矸石所含钾、钠等盐基物质在外界作用(如淋溶作用)影响下流失,当碱性盐基离子淋失后,土壤朝向酸性发展,导致土壤呈酸性[6,19-20];而本研究还得出矿区复垦改善了土壤的通透性,具体表现为增加了土壤容重、pH 值和总孔隙度,降低了土壤电导率、含水量和全盐含量(表 1),主要是由于随着矿区复垦年限的增加,土壤具有较好的保水和持水能力,土壤中的部分盐分聚积,引起了金属离子的溶解和电导率的增加,其土壤全量养分、有效养分及微生物活动均受到一定的影响。

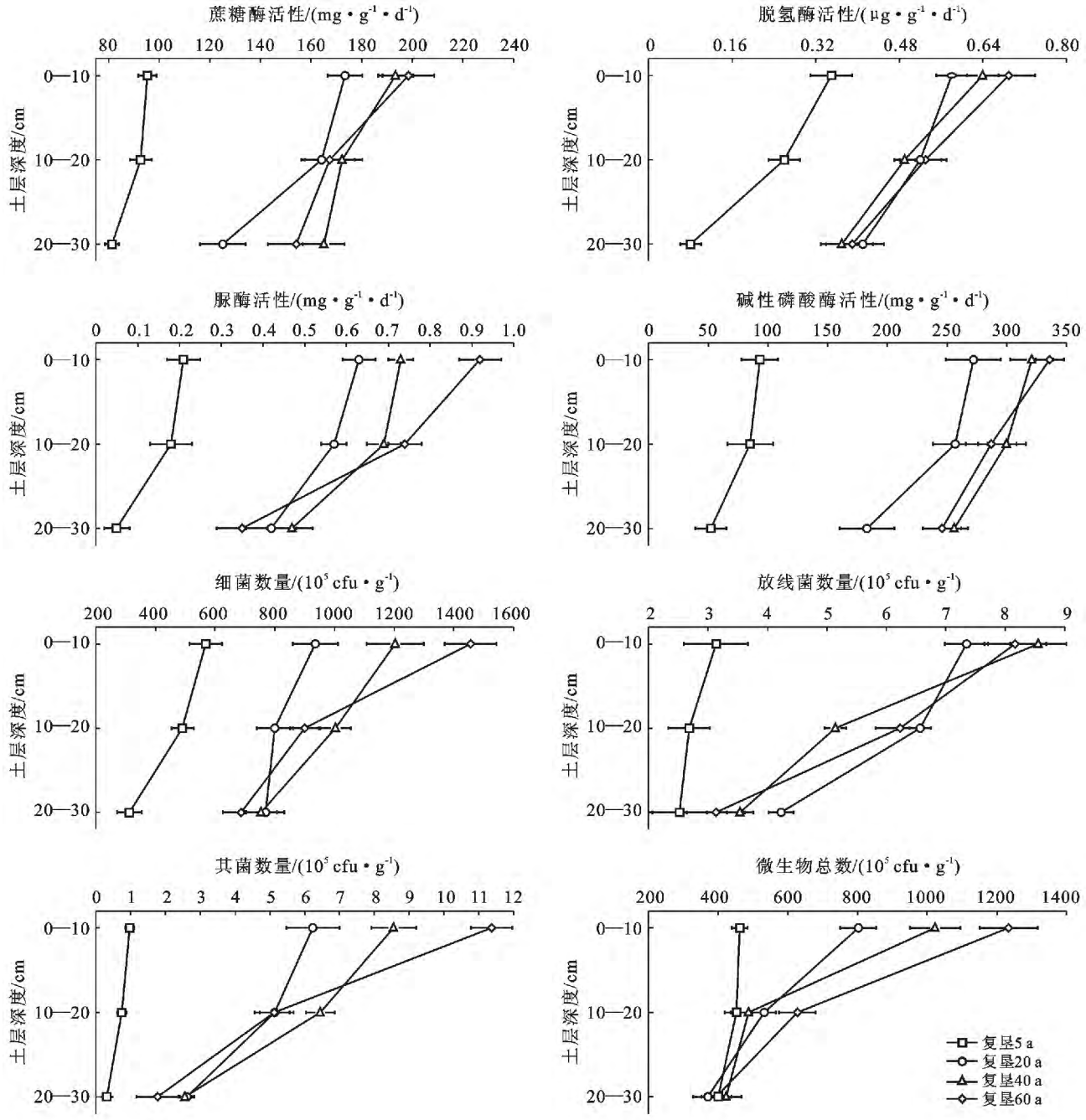



图 3　矿区复垦对土壤酶活性和微生物数量垂直分布的影响

### 3.2　矿区复垦对土壤养分的影响

土壤养分不仅能反映土壤“营养库”中养分的贮量水平,而且在一定程度上能影响有效养分的供应能力[10-11]。由图 2 可知,随着复垦时间的增加,矿区复垦土壤的全钾和有效钾含量均降低,有机质、全氮、碱解氮、微生物量碳和微生物量氮有所升高,而全磷和有效磷并没有明显的变化趋势。矿区土壤在复垦初期风化速度较快,尤其是在外界因素作用下导致其养

分增长幅度更加明显，这也是复垦 60 a 的矿区土壤养分含量较高的原因；同时，矿区土壤属于含碳矿物并且在排弃堆积过程中混有煤块使得土壤中总有机质较高，随着复垦年限的增加，复垦土壤养分含量增加明显，其中土壤中的有效磷、碱解氮含量呈现增加趋势，主要与复垦后土壤结构和环境变化有利于氮磷积累及人为影响有关[6,8,19-21]；由于矿区复垦土壤风化程度不同，钾素被不断释放，也不断被地表植被吸收利用及淋失，复垦区域内植物对钾素不断的吸收利用及淋溶作用的影响使得复垦土壤内部全钾、速效钾含量逐年减少，这与前人的研究结果一致[8,19-21]。由此可知，随着复垦年限的增长，除钾外矿区土壤中养分含量不断增多，尤其是全量态、有效态的氮含量以及微生物量碳和氮变化趋势比较明显。这说明矿区土壤在长期的自然、人为因素影响下，风化作用加强，土壤开始熟化。而矿区复垦并没有引起全磷含量的下降，主要是由于磷素是一种沉积性元素，由母质类型和成土条件决定，在土壤中的存在形式较稳定、不易流失[8-9,21]，因此，矿区复垦没有影响土壤全磷含量及其分布特征。

综合来看，复垦后土壤养分变化幅度较大，说明在矿区复垦过程中，土壤系统内部因子处于动态变化和平衡中，其中土壤微生物量的变化幅度最大，对复垦的响应最为敏感。

表 4 土壤酶活性、微生物数量与土壤养分相关分析

| 项目 | 有机碳 | 全氮 | 全磷 | 全钾 | 有效磷 | 碱解氮 | 有效钾 | 微生物量碳 | 微生物量氮 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 蔗糖酶 | 0.957** | 0.852** | 0.542* | 0.774** | −0.487** | −0.524* | −0.897** | 0.656** | 0.478* |
| 脱氢酶 | 0.885** | 0.785** | 0.367 | 0.653** | −0.678** | −0.345 | −0.777** | 0.557** | 0.532* |
| 脲酶 | 0.512* | 0.795** | 0.018 | 0.821** | −0.712** | −0.756** | −0.827** | 0.584** | 0.756** |
| 磷酸酶 | 0.745** | 0.623* | −0.214 | 0.315 | −0.521* | −0.689** | −0.562* | 0.478* | 0.123 |
| 细菌 | 0.924** | 0.882* | 0.312 | 0.487* | −0.841** | −0.845** | −0.203 | 0.885** | 0.912** |
| 放线菌 | 0.499* | 0.342 | −0.187 | 0.532* | −0.912** | −0.499* | −0.456* | 0.512* | 0.745** |
| 真菌 | 0.327 | 0.217 | −0.046 | 0.245 | −0.201 | −0.203 | −0.647** | 0.419* | 0.523* |

注：**表示相关性在 0.01 水平上显著(双尾)，*表示相关性在 0.05 水平上显著(双尾)。

### 3.3 矿区复垦对土壤酶活性的影响

蔗糖酶活性是表征土壤碳素循环和土壤微生物代谢活性的重要酶，能够反映土壤有机碳累积与分解转化规律[6,12-14]。由表 2 可知，矿区复垦后土壤蔗糖酶活性显著增加，说明土壤中有机物质的转化随复垦时间延长而更加强烈，同时植物的凋落物、根系的分泌物和衰亡的根增加了土壤有机物和土壤蔗糖酶转化的底物；土壤脱氢酶活性作为微生物氧化还原系统的指标，能较好地表征土壤中微生物的氧化能力[6,12-14]，矿区复垦为微生物的生长和繁殖提供碳源，并改善土壤的微环境，从而增加了脱氢酶活性及其来源；脲酶活性可用以指示土壤氮素循环及其相关的土壤活性[6,12-14]，综合分析图 1 和表 2 可知，矿区复垦造成了土壤脲酶活性显著增加，与同期土壤氮素含量变化一致；磷酸酶作为土壤中最活跃的一类酶能够促进有机磷化合物的水解和提高土壤磷元素的有效性，而本研究中矿区复垦增加了土壤磷酸酶活性，与同期土壤磷素的变化不尽一致，可能与磷素在土壤中的转化和循环有关[6,8,19-21]。

### 3.4 矿区复垦对土壤微生物数量的影响

土壤微生物三大类群的数量与其发挥的生态功能密切相关，其数量的增加反映出土壤质量的改善[10-11,21]。矿区复垦增加了凋落物、根系的分泌物和衰亡的根、根际沉积物等，为微生物的生长繁育提供了充足的能源，使微生物能够在一定时间内有效并快速恢复[6-9]，到复垦 60 a，微生物总数平均可达 $1.06\times10^8$ cfu/g，细菌、真菌和放线菌数量随着复垦年限的增加而增加，但其增加幅度逐渐减小(图 2)，主要是由于在矿区复垦中，土壤基质破坏了地表植被层，并且对土壤剖面进行了重构，使排土场地表物质成为深层土，使得作为微生物生命活动所需能源较为缺乏，局部限制了土壤微生物数量。

### 3.5 矿区复垦对土壤酶活性、微生物数量、土壤养分垂直分布的影响

从土壤养分的垂直分布特征来看(图 2—3)，矿区复垦对土壤酶活性、微生物数量、土壤养分垂直分布具有显著影响，随着土层深度的增加，土壤酶活性、微生物数量和土壤养分均呈降低趋势表现出明显的“表聚性”。复垦区域碳质页岩是一种极容易风化的岩石，随着复垦年限的增加，土壤剖面酶活性、微生物数量和土壤养分发生变化，由于表层的矸石受外界影响较大，相比剖面下层的矸石风化程度强，表层微生物活动、植物吸收利用以及淋溶作用使得复垦土壤剖面养分含量呈现“表聚性”[6-9,15]。土壤表层以下，土壤

酶活性、微生物数量和土壤养分急剧降低,10 cm 土层以下,土壤酶活性、微生物数量和土壤养分下降幅度逐渐降低;同层相比,基本表现为:60 a>40 a>20 a>5 a,局部有所波动,表明了矿区复垦增加了土壤酶活性、微生物数量和土壤养分(除了钾素和磷素),但并没有改变它们的垂直分布特征,而不同复垦年限深层土壤酶活性、微生物数量和土壤养分变化趋势并不大,可能是由复垦过程中表层、底层土混合产生的稀释效应。

### 3.6　土壤酶活性、微生物数量与土壤养分相关分析

复垦后土壤酶活性、微生物数量与土壤养分之间具有较强的相关性,土壤养分(除有效养分)与土壤酶活性和微生物数量基本呈正相关(表 4),表明了土壤有机质作为碳源和其他营养成分的来源,有利于微生物及酶活性活性的提高;而土壤酶活性、微生物数量与土壤有效含量之间呈显著或极显著负相关关系,主要是由于随着矿区复垦土壤中植被的恢复,植物生长吸收了部分营养元素,同时植物生长导致植物根际微生物活性有所升高,这与前人的研究结果一致[6-9,15,21]。综合表 2 的结果表明,矿区复垦过程中通过影响土壤微生物活动和代谢进而影响土壤养分及酶活性,它们之间可以看做相互作用和影响的一个地下有机整体,同时表明了土壤微生物与养分和酶活性等地下生态系统各指标之间的统一性。

## [ 参 考 文 献 ]


[1] Rooney R C, Bayley S E, Schindler D W. Oil sands mining and reclamation cause massive loss of peatland and stored carbon[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012,109(13):4933-4937.

[2] Dong Jihong, Yu Min, Bian Zhengfu, et al. The safety study of heavy metal pollution in wheat planted in reclaimed soil of mining areas in Xuzhou, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2012,66(2):673-682.

[3] Li Hua, Shao Hongbo, Li Weixiang, et al. Improving soil enzyme activities and related quality properties of reclaimed soil by applying weathered coal in opencast-mining areas of the Chinese Loess Plateau[J]. CLEAN-Soil, Air, Water, 2012,40(3):233-238.

[4] Yao Dduoxi, Meng Jun, Zhang Zhiguo. Heavy metal pollution and potential ecological risk in reclaimed soils in Huainan mining area[J]. Journal of Coal Science and Engineering(China), 2010,16(3):316-319.

[5] Palmer M A, Bernhardt E S, Schlesinger W H, et al. Mountaintop mining consequences[J]. Science, 2010, 327(5962):148-149.

[6] 钱奎梅,王丽萍,李江. 矿区复垦土壤的微生物活性变化[J]. 生态与农村环境学报,2012,27(6):59-63.

[7] 黄晓娜,李新举,刘宁,等. 不同施工机械对煤矿区复垦土壤颗粒组成的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(1):136-140.

[8] 张乃明,武雪萍. 矿区复垦土壤养分变化趋势研究[J]. 土壤通报,2003,34(1):58-60.

[9] 孙海运,李新举,胡振琪,等. 马家塔露天矿区复垦土壤质量变化[J]. 农业工程学报,2009,24(12):205-209.

[10] Waring B G, Weintraub S A, Sinsabaugh R. Relationships among climate, soil nutrients, and enzyme stoichiometry in low-latitude ecosystems: A pan-tropical analysis[C]. Minneapolis: 98th ESA Annual Meeting, 2013.

[11] Erwin A C, Geber M A, Agrawal A A. Specific impacts of two root herbivores and soil nutrients on plant performance and insect-insect interactions[J]. Oikos, 2013,122(12):1746-1756.

[12] Tian Lei, Dell E, Shi Wei. Chemical composition of dissolved organic matter in agroecosystems: Correlations with soil enzyme activity and carbon and nitrogen mineralization[J]. Applied Soil Ecology, 2010,46(3):426-435.

[13] Allison S D, Weintraub M N, Gartner T B, et al. Evolutionary-economic principles as regulators of soil enzyme production and ecosystem function[M]// Soil Enzymology. Berlin: Springer, 2011:229-243.

[14] Bell T H, Klironomos J N, Henry H A L. Seasonal responses of extracellular enzyme activity and microbial biomass to warming and nitrogen addition[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010,74(3):820-828.

[15] 郭逍宇,张金屯,宫辉力,等. 安太堡矿区复垦地植被恢复过程多样性变化[J]. 生态学报,2005,25(4):763-770.

[16] 董霁红,于敏,程伟,等. 矿区复垦土壤种植小麦的重金属安全性[J]. 农业工程学报,2011,27(12):280-286.

[17] 吴金水. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京:气象出版社,2006.

[18] 许光辉,郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京:农业出版社,1986.

[19] 丁青坡,王秋兵,魏忠义,等. 抚顺矿区不同复垦年限土壤的养分及有机碳特性研究[J]. 土壤通报,2007,38(2):262-267.

[20] 丁青坡,王秋兵,韩春兰,等. 矿区不同复垦年限土壤养分及有机碳特性研究:以抚顺矿区碳质页岩区复垦土壤为例[J]. 安徽农业科学,2006,34(17):4360-4363.

[21] 樊文华,白中科,李慧峰,等. 不同复垦模式及复垦年限对土壤微生物的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(2):330-336.